

纤维增强复合材料双轴强度研究进展

蔡登安 周光明 王新峰 黄翔 曹然

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,南京 210016)

文 摘 先对纤维增强复合材料双轴强度理论研究进行了简单的回顾,可将失效准则是否区分破坏模式分为两类,并且比较了各强度准则的特点与存在的问题。然后对纤维增强复合材料双轴加载实验装置的发展作了概括,对目前常用的复合材料双轴加载试样类型进行了总结分析,指出了双轴加载试样设计要求及各试样类型的优缺点。最后,对纤维增强复合材料的双轴强度研究进行了简要评述与展望。

关键词 纤维增强复合材料,双轴强度,强度准则,实验方法

中图分类号:TB3,V25

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.002

A Review of Biaxial Strength of Fiber Reinforced Composite Materials

CAI Deng'an ZHOU Guangming WANG Xinfeng HUANG Xiang CAO Ran

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Firstly, biaxial strength theories of fiber reinforced composite materials are briefly reviewed. The failure criteria proposed to predict composite failure can be divided into two main groups according whether to distinguishing failure modes or not. Merits and defects of different failure criteria are discussed and analyzed. Secondly, the development of biaxial testing equipments for the composites is summarized in a nutshell. Different types of specimen for biaxial loading with their characteristic problems are shown adequately. Finally, a concise assessment of biaxial strength of fiber reinforced composite materials is provided, and the future development trend is also predicted.

Key words Fiber reinforced composites, Biaxial strength, Strength criteria, Experimental methods

0 引言

纤维增强复合材料具有轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀等特点,目前已在航空航天、能源机械等领域代替了传统的金属材料,得到了广泛的应用^[1-4]。随着各种先进复合材料的开发和应用,纤维增强复合材料在承力结构中的应用比重越来越大,使得复合材料承受的应力状态也越来越复杂。因此,对纤维增强复合材料的强度特性,特别是复杂应力状态下力学性能的研究也越发必要,以保证纤维增强复合材料结构在使用中的安全。同时,由于缺乏双轴应力或多轴应力状态下的强度数据,限制了已有强度理论的发展和强度理论的提出^[5]。因此,无论是验证已有强度理论,还是提出新强度理论,无论是为了保证复合材料结构的

使用安全,还是从损伤角度研究复合材料特性,对复合材料进行双轴或多轴加载研究都具有非常重要的理论意义和工程价值。

近40年来,国内外学者针对纤维增强复合材料的双轴强度进行了大量研究和探讨^[6-15],但由于实验条件的限制,国内对此方面的研究仍相对较少。纤维增强复合材料的双轴强度研究,主要是研究复合材料在双轴载荷下的力学行为。通过分析材料在双轴应力状态下的变形及破坏行为,建立合理的双轴强度理论预测模型,为纤维增强复合材料的合理利用及其结构设计提供重要的参考依据。本文将对纤维增强复合材料双轴强度理论研究中广泛应用的强度准则以及实验研究中加载装置和试样类型等进行深入的分

收稿日期:2013-10-18

基金项目:江苏省高校优势学科建设工程项目资助(PAPD);南京航空航天大学研究生创新基地开放基金项目(kfj130104)

作者简介:蔡登安,1988年生,博士研究生,主要从事复合材料结构设计及其强度理论研究。E-mail:cda@nuaa.edu.cn

通讯作者:周光明,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn

析与阐述。

1 双轴强度理论研究

纤维增强复合材料双轴强度准则主要可以分为两类:一是不区分破坏模式的失效准则,包含所有的多项式和张量准则,用数学表达式作为材料强度的函数来描述失效面;二是区分破坏模式的失效准则,考虑复合材料非均匀特性导致不同的破坏模式,利用材料强度建立区分不同破坏模式的失效准则表达式。

1.1 不区分破坏模式的失效准则

1.1.1 Tsai-Hill 准则^[16]

Hill 在 Von Mises 提出的各向同性材料屈服准则的基础上,提出了针对各向异性材料的失效准则。Tsai 在 Hill 的基础上推导出用单层复合材料强度 X 、 Y 和 S 表示的破坏准则,称为 Tsai-Hill 准则。

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (1)$$

Tsai-Hill 准则考虑了破坏强度 X 、 Y 和 S 之间的相互联系,但未区分拉、压性能不同的复合材料。Fan^[17] 建议根据实际的应力符号带入相应的拉伸或压缩强度。

1.1.2 Hoffman 准则^[18]

考虑拉、压强度不同的复合材料,在 Tsai-Hill 准则中增加线性项,Hoffman 提出了如下新理论:

$$\frac{X_c - X_t}{X_t X_c} \sigma_1 + \frac{Y_c - Y_t}{Y_t Y_c} \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (2)$$

1.1.3 Franklin-Marin 准则^[19]

Franklin 修正了 Marin 于 1956 年提出的失效准则。Marin 在 Mises 准则的基础上增加了拉、压性能不同的项,但却未增加剪应力项,同时也未考虑横向拉、压强度的不同。Franklin 克服了这些弱点,同时增加了包含双轴强度的项:

$$\frac{X_c - X_t}{X_t X_c} \sigma_1 + \frac{Y_c - Y_t}{Y_t Y_c} \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} - \frac{K_{12} \sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (3)$$

参数 K_{12} 通过双轴拉伸试验确定。当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, $\tau_{12} = 0$ 时,有

$$K_{12} = 1 + \frac{1}{\sigma} \left[(X_c - X_t) + (Y_c - Y_t) \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} \right] + \frac{X_t X_c}{Y_t Y_c} - \frac{X_t X_c}{\sigma^2} \quad (4)$$

当 $K_{12} = 1$ 时,(3)式即为 Hoffman 准则表达式。

1.1.4 Tsai-Wu 准则^[20]

Tsai-Wu 准则是一个张量多项式的形式,假定在应力空间中破坏表面存在下列形式:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

在平面应力状态和横观各向同性条件下,准则多项式可化为

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (6)$$

其中, $F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$, $F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$, $F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}$, $F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}$, $F_{66} = \frac{1}{S^2}$; 强度系数 F_{12} 需通过双轴试验来确定,如进行双轴拉伸试验($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$),可得

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma} \left[1 - \left(\frac{X_c - X_t}{X_t X_c} + \frac{Y_c - Y_t}{Y_t Y_c} \right) \sigma - \frac{X_t X_c + Y_t Y_c}{X_t X_c Y_t Y_c} \sigma^2 \right] \quad (7)$$

将强度系数 F_{12} 无量纲化,用 F_{12}^* 表示为

$$F_{12}^* = \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{11} F_{22}}} \quad (8)$$

为确保准则方程确定一个封闭的破坏包络面(线), F_{12}^* 的取值范围是: $-1 \leq F_{12}^* \leq 1$ 。

应用 Tsai-Wu 准则时,有时取 $F_{12}^* = 0$,但通过对玻璃/环氧等复合材料的计算表明,强度系数 F_{12}^* 的影响不应忽略^[21]。Tsai 和 Hahn^[22] 提出取 $F_{12}^* = -0.5$,既满足 Mises 假设,又可获得理论与实验符合较好的结果。

1.1.5 Wu-Scheublein 准则^[23]

考虑多向层合板的各向异性特点,在 Tsai-Wu 张量准则的基础上增加三次项,平面应力状态下的 Wu-Scheublein 准则可表示为

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 3F_{112} \sigma_1^2 \sigma_2 + 3F_{221} \sigma_2^2 \sigma_1 + 3F_{166} \sigma_1 \sigma_6^2 + 3F_{266} \sigma_2 \sigma_6^2 = 1 \quad (9)$$

确定以上 4 个三次项系数则需要大量的实验工作,因而工程上较少使用。

1.2 区分破坏模式的失效准则

此类强度准则具有预测不同破坏模式的优势,因而多应用于渐进损伤分析^[24]。不同的破坏模式主要包含纤维断裂和基体破坏。

1.2.1 最大应力准则^[25]

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= X_t (\sigma_1 > 0) & \sigma_1 &= -X_c (\sigma_1 < 0) \\ \sigma_2 &= Y_t (\sigma_2 > 0) & \sigma_2 &= -Y_c (\sigma_2 < 0) \end{aligned} \quad (10)$$

$$|\tau_{12}| = S$$

1.2.2 最大应变准则^[26]

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_{X_t} (\varepsilon_1 > 0) & \varepsilon_1 &= -\varepsilon_{X_c} (\varepsilon_1 < 0) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{Y_t} (\varepsilon_2 > 0) & \varepsilon_2 &= -\varepsilon_{Y_c} (\varepsilon_2 < 0) \end{aligned} \quad (11)$$

$$|\varepsilon_{12}| = \varepsilon_s$$

1.2.3 Hashin-Rotem 准则^[27]

Hashin-Rotem 准则包含两种破坏机理——纤维断裂和基体失效,同时区分拉伸和压缩两种不同情况。纤维断裂:

$$\sigma_1 = X_t (\sigma_1 > 0) \quad \sigma_1 = -X_c (\sigma_1 < 0) \quad (12)$$

基体失效:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 &= 1 (\sigma_2 > 0) \\ \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 &= 1 (\sigma_2 < 0) \end{aligned} \quad (13)$$

1.2.4 Hashin 准则^[28]

Hashin 后来在 Hashin-Rotem 准则的基础上,提出了针对纤维增强复合材料在三维应力状态的失效准则。在纤维拉伸破坏模式中考虑剪应力的影响,在基体失效模式中增加二次多项式的项数以克服线性准则低估材料强度的缺点。

纤维拉伸断裂: ($\sigma_1 > 0$)

$$\frac{\sigma_1}{X_t} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad \text{或} \quad \sigma_1 = X_t \quad (14)$$

纤维压缩断裂: ($\sigma_1 < 0$)

$$\sigma_1 = -X_c \quad (15)$$

基体拉伸破坏: ($\sigma_2 + \sigma_3 > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_t}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (16)$$

基体压缩破坏: ($\sigma_2 + \sigma_3 < 0$)

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2S_{23}}\right)^2 + \\ \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \end{aligned} \quad (17)$$

1.2.5 Puck 准则^[29]

Puck 准则考虑两种不同的破坏类型:纤维间破坏(基体破坏)和纤维断裂。该准则与 Hashin 准则最大的不同是考虑了基体的三种破坏模式,区分不同载荷条件下破坏平面与层压板之间的夹角,见图 1。

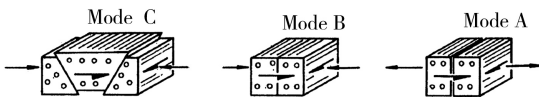


图 1 三种纤维间(基体)破坏模式

Fig. 1 Three inter-fiber fracture (matrix cracking) modes

图 1 中 A 模式表示拉伸和剪切导致的破坏, B 模式代表剪切和弱压缩产生的破坏, C 模式表示剪切和强压缩导致的破坏。根据不同的破坏模式,纤维间破坏可用三个方程描述。A 模式的破坏包络线可用如

下椭圆方程描述:

$$\sqrt{\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(1 - p'_{12} \frac{Y_t}{S_{12}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2} + p'_{12} \frac{\sigma_2}{S_{12}} = 1 (\sigma_2 > 0) \quad (18)$$

其中,参数 p'_{12} 表示包络线与 τ_{12} 轴相交时的切线斜率,通过试验确定。

B 模式可用如下抛物线方程描述:

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_{12}} \left(\sqrt{S_{12}^2 + (p'_{12} \sigma_2)^2} + p'_{12} \sigma_2 \right) &= 1 \\ \left(\sigma_2 < 0, 0 \leq \left| \frac{\sigma_2}{\tau_{12}} \right| \leq \frac{R_{23}}{S_{12} \sqrt{1 + 2p'_{23}}} \right) & \quad (19) \end{aligned}$$

C 模式可用如下椭圆方程描述:

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{\tau_{12}}{(2(1 + p'_{23}) S_{12})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y_c} \right)^2 \right] \frac{Y_c}{- \sigma_2} &= 1 \\ \left(\sigma_2 < 0, 0 \leq \left| \frac{\tau_{12}}{\sigma_2} \right| \leq \frac{S_{12} \sqrt{1 + 2p'_{23}}}{R_{23}} \right) & \quad (20) \end{aligned}$$

式中,参数 p'_{12}, p'_{23} 表示包络线与 τ_{12} 轴相交时的切线斜率, R_{23} 通过如下表达式确定:

$$R_{23} = \frac{Y_c}{2} (\sqrt{1 + p'_{23}} - p'_{23}) \quad (21)$$

$$p'_{23} = \frac{p'_{12}}{S_{12}} S_{23} \quad (22)$$

准则中各系数的确定较为复杂,部分参数依赖于经验值。该理论对于单向复合材料的预报与实验吻合较好,对层合板最终强度的预报大体上与实验相符。当出现较大非线性变形时,预报的最终强度与实验值存在较大差别。

1.3 强度准则比较

对于同种复合材料,不同强度准则在平面应力状态下形成的破坏包络线存在一定的差异,部分强度准则拟合的包络线比较如图 2、图 3 所示。绘制曲线所需参数采用文献[30]中双轴向纤维增强复合材料的强度参数。Tsai-Wu 准则中无量纲强度系数 F_{12}^* 取值 -0.5, Puck 准则中斜率参数 $p'_{12} = 0.2/p'_{12} = 0.3$ 。

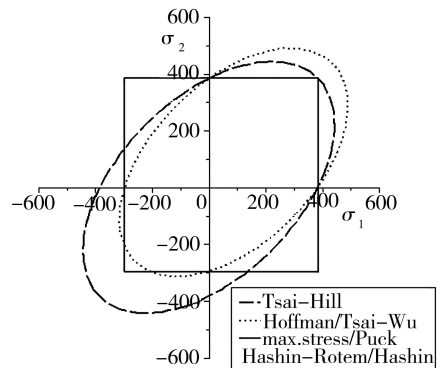


图 2 σ_1 - σ_2 平面强度准则比较

Fig. 2 Comparison of strength criterion in σ_1 - σ_2 plane

双向应力比,只能测定固定应力比下的强度值。

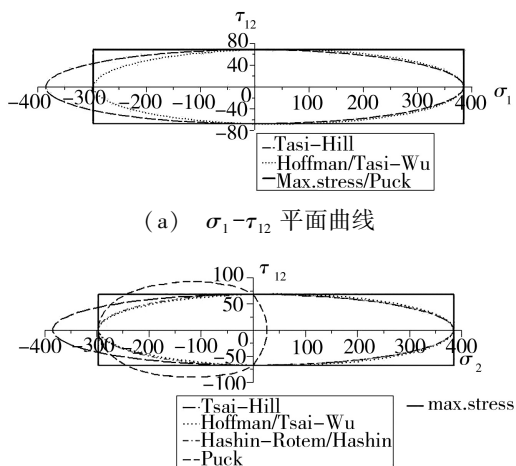


图3 $\sigma-\tau_{12}$ 平面强度准则比较

Fig. 3 Comparison of strength criterion in $\sigma-\tau_{12}$ plane

由图2可以看出,在 $\sigma_1-\sigma_2$ 平面的不同象限,各强度准则表现出较大的差异:一、三象限(拉-拉和压-压应力状态)最大应力准则、Hashin准则和Puck准则的预报强度值偏于保守和安全;二、四象限(拉-压应力状态)Tsai-Hill准则、Hoffman准则和Tsai-Wu准则相对偏于保守和安全。与此不同的是, $\sigma-\tau_{12}$ 平面(图3)表现出较为一致的结果:最大应力准则和Puck准则在两个方向拉/压-剪组合应力状态下形成的强度包络线较其他准则偏于危险;同时,Puck准则在一、四象限的拟合曲线并不适合预报双向纤维增强复合材料的失效范围,如图3(b)所示。因此,研究纤维增强复合材料的双轴强度时应注意选择合适的强度准则进行失效预报和验证。

2 双轴加载实验研究

2.1 双轴加载实验装置

为获得准确的双轴加载实验数据,合理有效的双轴加载实验装置是必不可少的。迄今为止双轴加载实验装置可分为两类:(1)单一加载系统实验装置;(2)两个或多个独立加载系统实验装置。第一类中,双轴加载应力比取决于试件的几何形状或者加载装置的构造;而第二类实验装置则可通过各加载元件控制双轴加载应力比。

2.1.1 单一加载系统实验装置

图4(a)是我国早期自行研制的机械式双向拉伸实验仪^[31],它结构简单,使用方便,性能优良,可直接在万能实验机上进行1:1或1:2的平板双向拉伸实验。利用万能实验机加载,其测力部件是四个夹持测力杆(传感器),并在夹持试件的平面内,上下都安装了五个加紧螺母,使双轴拉伸试件的四个分枝在一个水平面上,同时保证在加载过程中不产生滑移。图4(b)是法国专利双向拉伸实验仪,原理与图4(a)所示装置大同小异。它们的共同缺点是不能独立改变

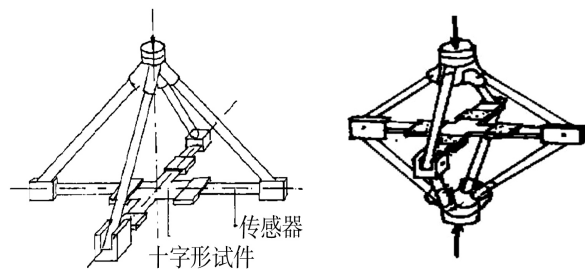


图4 固定应力比双轴拉伸实验装置

Fig. 4 Biaxial tensile test device in the fixed stress ratio

图5是印度技术学院工程力学系开发的平面双轴加载装置^[32]。该实验装置适用于聚合物材料,可以进行 $\sigma_1-\sigma_2$ 应力空间任何拉-拉应力组合加载,即可实现任意应力比的双轴拉伸实验。如图5(a),只需改变斜杆(8)在底座(1)上的位置便可改变双轴载荷荷比。此装置简单易行,只需连接在任一单向材料实验系统(如拉伸强度实验机)上便可达到各种应力比的双轴拉伸载荷,如图5(b)所示。

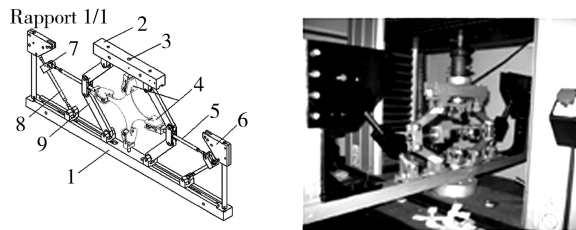


图5 双轴拉伸实验装置

Fig. 5 Biaxial tensile experiment device

2.1.2 两个或多个独立加载系统实验装置

文献[33]介绍了一种Instron 8502拉/压-扭转液压试验机。该试验机由两个加载系统组成:拉压加载系统和扭转加载系统,最大加载扭矩为2 kN·m,最大加载轴力为 ± 100 kN,可进行相应的拉/压-扭转双轴应力加载试验。

布鲁塞尔自由大学(VUB)研发了平面双轴实验设备^[34],如图6所示。

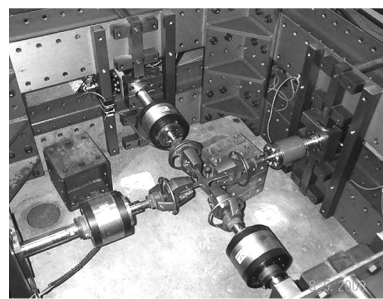


图6 平面双轴四缸实验设备

Fig. 6 Plane biaxial four-cylindertest device

该实验设备每个液压缸的行程为150 mm,最大加载100 kN,可以进行静态加载或频率不大于20 Hz的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第4期

动态加载。每个液压缸均是独立控制,通过专用软件和控制系統可以进行任何类型加载波形的实验。该装置中用四个铰链将伺服液压控制液压缸连接到实验框架上,因而只能进行双轴拉伸载荷实验,即把实验结果限定在了二维应力空间的第一象限。该装置可用于复合材料或金属的双轴拉伸性能实验。

图7是长春机械科学研究院有限公司研发生产的SDS100电液伺服动静实验机。该实验机是一种使用方便、控制测量精度高、可靠性好、使用范围广的用于金属、复合材料以及零部件动静态力学性能的实验设备。可用于拉伸、压缩、低周和高周疲劳,裂纹扩展、断裂力学以及其他各种力学实验。具有位移、负荷、变形三种控制方式,并且在液压源开启情况下,三种控制方式相互之间进行平稳切换。位移、负荷变形具有限位保护功能。四缸均是独立控制,每缸最大加载 ± 100 kN,最大加载位移 ± 60 mm,可实现任意比例的拉压双轴加载实验。根据载荷谱的不同,函数发生器可产生多种实验波形,包括正弦波、三角波、锯齿波、方波、组合波和外部输入波形等多种测试波形。该实验机采用最新研制的数字式电箱,其内部采用模块化设计,全部操作和设置均由系统软件的虚拟面板实现。南京航空航天大学配备了此实验机。

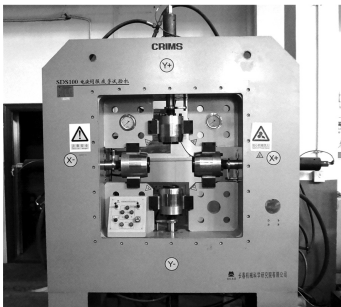


图7 SDS100电液伺服动静实验机

Fig. 7 Electro-hydraulic servo equipment

2.2 双轴加载试样类型

进行双轴加载实验研究,最重要的是加载试样的设计与选取。关于双轴加载试样,Whitney^[35]提出了如下要求:

- (1) 试样的试验区域应处于均匀应力状态;
- (2) 试验区域应力水平较高,以保证初始破坏发生在该区域;

- (3) 应力状态应该直接得到而无需附加测量;
- (4) 可以独立改变双向应力中的任一应力分量。

这些要求决定了双轴加载试样的形状、尺寸、分析及测试方法。目前,双轴加载试样的类型主要有:偏轴拉压试样、十字夹芯梁试样、平板试样、圆盘试样、薄壁圆管试样以及十字型试样。

2.2.1 偏轴拉压试样

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第4期

偏轴拉压试样是实现双轴应力最简单的几何形式,通过改变单向加载方向和纤维方向夹角来获得不同载荷比的平面应力,如图8所示。偏轴拉压试样的缺点是不能独立改变各应力分量的大小。同时,Pipes和Cole^[36]提出偏轴拉压试样并不适合用来确定Tsai-Wu准则中的强度系数 F_{12} ,因为基体破坏可能是由于自由边效应^[37]引起的,导致测得的强度低于实际值。

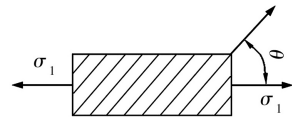


图8 偏轴拉伸试样

Fig. 8 Off-axis specimen

2.2.2 十字夹芯梁试样^[9]

十字夹芯梁试样主要用于夹层结构的双轴加载试验,其结构形式如图9所示。双轴应力状态主要由梁的弯曲变形产生,剪应力大小可根据纤维方向改变而调整。因十字夹芯梁试样容易在两臂中心交角处产生应力集中和脱粘而提前破坏,故其应用受到限制。

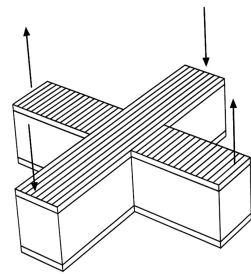


图9 十字夹芯梁试样

Fig. 9 Cross beam

2.2.3 平板试样

平板式样在四个边进行拉、压加载,剪应力分量通过纤维方向控制,试样形式如图10所示。因四周的连接柄不可能无限小,产生的应力状态并不均匀,所以这类试样需要进一步改进和优化。同时,这样的几何形式主要用于开口试样的双轴加载试验^[38]。

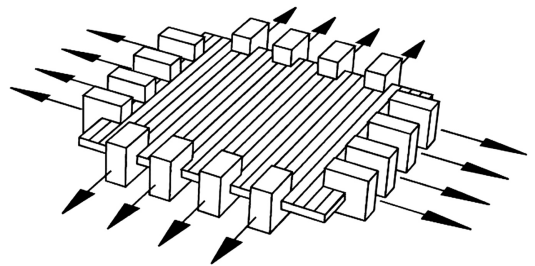


图10 平板试样^[9]

Fig. 10 Flat plate^[9]

2.2.4 圆盘试样

Arcan等人^[39]提出了采用如图11所示具有中心反对称 $\pm 45^\circ$ 切槽的圆盘试样,进行纤维增强复合材

料的双轴应力测试。双轴应力状态通过加载角 α 控制 ($\alpha = 0^\circ$ 对应纯面内剪切状态) :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_\alpha \sin\alpha \quad \tau_{xy} = \sigma_\alpha \cos\alpha \quad \sigma_\alpha = p_\alpha / A \quad (23)$$

式中, A 为试验区域面积。

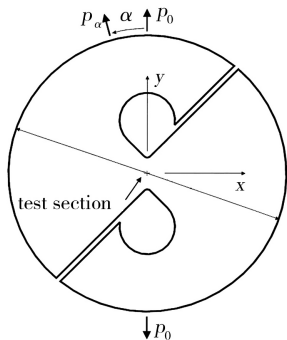


图 11 圆盘试样

Fig. 11 Circular specimen

Marloff^[40] 利用该试样对玻璃/环氧复合材料进行了 $-15^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 加载范围的有限元分析。分析结果表明, 加载角为 0° 时的应力状态最均匀, 加载角的绝对值越大, 均匀应力状态范围越小。此外, 剪切模量计算值比较准确, 而剪切强度低于其他试样类型的计算值。

2.2.5 薄壁圆管试样^[33,41-43]

薄壁圆管试样是最通用和使用最广泛的一种双轴加载试样, 如图 12 所示。三个平面应力可相互独立得到: 轴向拉/压载荷获得轴向应力, 施加内/外压产生环向应力, 扭转加载得到剪应力。纤维增强复合材料圆管试样主要分为三种纤维走向: 轴向或环向单向层合圆管、缠绕层合圆管和多向层合圆管。

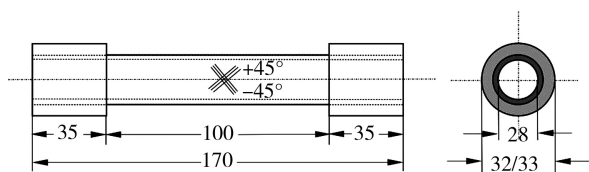


图 12 薄壁圆管试样^[33]

Fig. 12 Thin-walled tube^[33]

圆管试样必须是薄壁结构, Rizzo 和 Vicario^[41] 提出 $t/d \leq 0.02$ (t 为壁厚, d 为管直径)。试样长度应保证中间部分 (即试验区) 应力均匀。

2.2.6 十字型试样

十字型试样能直观地反映板壳复合材料的双轴受力状态, 是目前最受重视的一种双轴加载试样, 因而越来越多的复合材料双向强度研究者^[34,44-49] 把研究重点放到这方面来了。

典型的十字型双轴拉伸试样如图 13 所示, A 部分为加载臂——承受和传递载荷, B 部分为中心试验区——均匀双向应力区域。十字型试样设计需满足

以下要求^[34]: (1) 均匀双轴应力区域最大化; (2) 中心试验区剪应力最小化; (3) 中心试验区外应力集中尽量小; (4) 初始破坏发生在试验区; (5) 试验结果可重复。以上 5 点要求使得十字型试样能够顺利完成双轴加载试验, 同时保证试验数据的准确性和有效性。

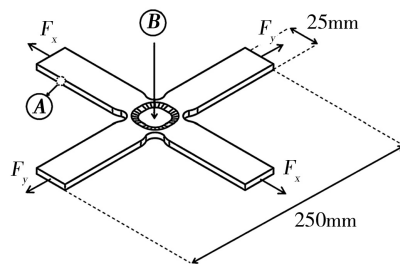


图 13 十字型试样^[46]

Fig. 13 Cruciform specimen^[46]

3 结语

纤维增强复合材料双轴强度研究主要集中在不区分失效模式的多项式准则和区分失效模式的强度准则两方面。目前使用最多的是区分失效模式的强度准则, 它们的优点是能够较为准确的预报纤维增强复合材料的破坏形式, 与材料的实际损伤形式较为符合。双轴强度实验设备从简单的机械式加载装置发展为可以实现任意加载比例的电液伺服加载系统, 为获得准确、有效的实验数据提供了最基本的保障。

由于纤维增强复合材料不均匀性和各向异性的特点, 给出一个非常精确的双轴强度准则或统一的一般表达式是十分困难的。并且不同的强度准则均有其特定的适用性和局限性。同时, 材料双轴强度准则原则上取决于双轴试验的结果, 但由于目前纤维增强复合材料的双轴强度试验数据相对较少, 因而无法对现有的双轴强度理论作出详细而全面的评估, 也限制了更适用于此类材料的强度准则的提出与发展。此外, 国内关于这方面的研究也明显滞后于国外。加强双轴强度研究仍将是今后纤维增强复合材料强度研究的重要方面。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12
- [2] 刘代军, 陈亚莉. 先进树脂基复合材料在航空工业中的应用[J]. 材料工程, 2008(增刊 1): 194-198
- [3] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2): 143-151
- [4] Huda Z, Edi P. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: a review [J]. Materials & Design, 2013, 46: 552-560

- [5] Hinton M J, Kaddour A S, Soden P D. Failure criteria in fiber reinforced polymer composites; the world-wide failure exercise [M]. Access online via Elsevier, 2004
- [6] Soden P D, Leadbetter D, Griggs P R, et al. The strength of a filament wound composite under biaxial loading [J]. *Composites*, 1978, 9(4): 247-250
- [7] Toombes G R, Swanson S R, Cairns D S. Biaxial testing of composite tubes [J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25(2): 186-192
- [8] Arnold W S, Robb M D, Marshall I H. Failure envelopes for notched CSM laminates under biaxial loading [J]. *Composites*, 1995, 26(11): 739-747
- [9] Thom H. A review of the biaxial strength of fibre-reinforced plastics [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, 29(8): 869-886
- [10] Moreno S, López Cela J J. Failure envelope under biaxial tensile loading for chopped glass-reinforced polyester composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 72(1): 91-96
- [11] Moreno S, Martínez Vicente J L, López Cela J J. Failure strain and stress fields of a chopped glass-reinforced polyester under biaxial loading [J]. *Composite Structures*, 2013, 103: 27-33
- [12] 谢仁华. 复合材料双向应力实验述评[J]. *宇航材料工艺*, 1991(1): 12-18
- [13] 付求舟, 王兴业. 双向拉伸载荷作用下层合板强度的实验研究[J]. *宇航材料工艺*, 1994(4): 22-26
- [14] 周光明, 陆晓华, 许正辉. 细编穿刺3D碳/碳复合材料双向拉伸实验研究[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(3): 390-393
- [15] 罗以喜. 双向载荷下双轴向经编柔性复合材料有限元模拟[J]. *纺织学报*, 2011, 32(12): 60-63
- [16] Azzi V D, Tsai S W. Anisotropic strength of composites [J]. *Experimental Mechanics*, 1965, 5(9): 283-288
- [17] Fan W. On phenomenological anisotropic failure criteria [J]. *Composites Science and Technology*, 1987, 28(4): 269-278
- [18] Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1967, 1(2): 200-206
- [19] Franklin H G. Classic theories of failure of anisotropic materials [J]. *Fibre Science and Technology*, 1968, 1(2): 137-150
- [20] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1971, 5(1): 58-80
- [21] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [22] Tsai S W, Hahn H T. Introduction to composite materials [M]. Westport: Technomic Publishing Co., 1980
- [23] Wu E M, Scheublein J K. Laminate strength—a direct characterization procedure [C]. *Composite Materials: Testing and Design (Third Conference)*, ASTM STP 546, American Society for Testing and Materials, 1974: 188-206
- [24] Camanho P P. Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites [M]. DEMEGI, FEUP, 2002: 1-13
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第4期
- [25] Jenkin C F. Report on materials used in the construction of aircraft and aircraft engines [R]. HM Stationery Office, London, 1920: 95-131
- [26] Jones R M. Mechanics of composite materials [M]. London: Taylor & Francis, 1975
- [27] Hashin Z, Rotem A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials [J]. *Journal of composite materials*, 1973, 7(4): 448-464
- [28] Haszin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(2): 329-334
- [29] Puck A, Schürmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(7): 1045-1067
- [30] 钱元, 周光明, 蔡登安, 等. 双向轴纤维增强复合材料层合板强度准则[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(2): 179-185
- [31] 任家陶, 李冈陵, 豆志武, 等. 双向拉伸试验的进展与钛板双向拉伸的强化研究[J]. *实验力学*, 2001, 16(2): 196-206
- [32] Bhatnagar N, Bhardwaj R, Selvakumar P, et al. Development of a biaxial tensile test fixture for reinforced thermoplastic composites [J]. *Polymer Testing*, 2007, 26(2): 154-161
- [33] Antoniou A E, Kensche C, Philippidis T P. Mechanical behavior of glass/epoxy tubes under combined static loading. Part I: Experimental [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(13): 2241-2247
- [34] Smits A, Van Hemelrijck D, Philippidis T P, et al. Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(7): 964-975
- [35] Whitney J M, Daniel I M, Pipes R B. Experimental mechanics of fiber reinforced composite materials [M]. Society for Experimental Stress Analysis, 1982
- [36] Pipes R B, Cole B W. On the off-axis strength test for anisotropic materials I [J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(2): 246-256
- [37] Pipes R B, Pagano N J. Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension [J]. *Journal of Composite Materials*, 1970, 4(4): 538-548
- [38] Daniel I M. Behavior of graphite/epoxy plates with holes under biaxial loading [J]. *Experimental Mechanics*, 1980, 20(1): 1-8
- [39] Arcan M, Hashin Z, Voloshin A. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials [J]. *Experimental Mechanics*, 1978, 18(4): 141-146
- [40] Marloff R H. Finite element analysis of biaxial stress test specimen for graphite/epoxy and glass fabric/epoxy composites [J]. *Composite Materials: Testing and Design*, 1982, 787: 34-49
- [41] Rizzo R R, Vicario A A. A finite element analysis of laminated anisotropic tubes; (Part I—A characterization of the off-axis tensile specimen) [J]. *Journal of Composite Materials*, 1970, 4(3): 344-359

[42] Soden P D, Hinton M J, Kaddour A S. Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates; failure exercise benchmark data [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(12): 1489-1514

[43] Majid A, Assaleh T A, Gibson A G, et al. Ultimate elastic wall stress (UEWS) test of glass fibre reinforced epoxy (GRE) pipe [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(10): 1500-1508

[44] Antoniou A E, Van Hemelrijck D, Philippidis T P. Failure prediction for a glass/epoxy cruciform specimen under static biaxial loading [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(8): 1232-1241

[45] Makris A, Vandenbergh T, Ramault C, et al. Shape optimisation of a biaxially loaded cruciform specimen [J]. Poly-

mer Testing, 2010, 29(2): 216-223

[46] Lamkanfi E, Van Paepegem W, Degrieck J, et al. Strain distribution in cruciform specimens subjected to biaxial loading conditions. Part 1: Two-dimensional versus three-dimensional finite element model [J]. Polymer Testing, 2010, 29(1): 7-13

[47] 贾永刚, 张为华, 张炜. 固体推进剂双向拉伸试件优化设计及试验[J]. 推进技术, 2011, 32(5): 737-740

[48] 许承海, 孟松鹤, 齐菲, 等. 三维机织碳/碳复合材料双轴压缩载荷下的力学行为[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 206-211

[49] Sun X S, Haris A, Tan V B C, et al. A multi-axial fatigue model for fiber-reinforced composite laminates based on Puck's criterion [J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(4): 449-469

(编辑 李洪泉)

科技论文撰写规则

李洪泉

《宇航材料工艺》编辑部

撰写科技论文,除了要求其内容具有鲜明的科学性和创新性外,对论文的规范性亦有严格要求。一篇论文先写什么,后写什么,各部分应写什么内容以及有关文字、技术细节,包括名词术语、数字、符号、量和单位的使用、图表的设计、参考文献的著录等等都应符合标准化和规范化的要求。这样有利于论文所报道科技信息的收集、传播、交流和管理。一篇表达规范、符合出版要求的论文,有利于文稿的采用。

借此,根据有关的国家标准,介绍科技论文的编写格式及一些撰写细则,供作者参考。

1 科技论文的构成及撰写要求

一般科技期刊论文的组成部分和排列次序为:题名、作者署名、文摘、关键词、中图分类号、引言、正文、结论(和建议)、致谢(必要时)、参考文献、附录(必要时)。下面介绍各部分的写作要求。

1.1 题名

题名又叫文题、题目,是论文的总纲,论文的题目应达到以下几方面的要求。

(1) 准确具体,简短精炼

要准确地表达论文的中心内容,恰如其分地反映论文的研究范围和深度,文字要简练,一般不应超过 20 字。

(2) 便于检索,容易认读

题名所用词语要有助于选定关键词和编制题录、索引等二次文献,要避免使用非公知、公用的缩略词、字符和代号等。

(3) 说明题名的重要信息

内容包括国家自然科学基金会资助项目、课题获奖情况等,可用“*”号注释,并著录在首页的地脚位置。

(4) 英文题名的特殊要求

GB 7713—87 规定,公开发表的论文应附有英文题名,以利于国际交流。

a. 英文题名内容应与中文题名一致,字数不应过长(一般不超过 14 个词)。

b. 题名构成以名词短语为主要形式。字母可全部大写,或每个词的首字母大写,但 3 个或 4 个字母以下的冠词、连词、介词全部小写,或题名的第一个词的首字母大写,其余字母均小写。

c. 题名首的冠词一般可以省略。

(下转第 30 页)